4К

УДК 621.317.07.089

В.П. Куценко [1], *С.П. Сергиенко* [2]
[1]Государственный университет информатики и искусственного интеллекта,
г. Донецк, Украина
[2]Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина
donetsk50@mail.ru

Анализ спектра мощности случайных сигналов на выходе смесителя радиометра крайне высокой частоты

Предложен метод, позволяющий проводить анализ спектра мощности шумовых низкоинтенсивных сигналов на выходе смесителя радиометра крайне высокой частоты на основе воздействия случайного сигнала на полупроводниковый диод, включённый в конце длинной линии.

Введение

Радиометрические измерительные приемники широко используются в различных областях науки и техники: в системах пассивной локации, дистанционного измерения температуры, исследования свойств материалов, характеристик атмосферы и т.д. При этом диапазон измерений из дециметровых и сантиметровых волн активно перемещается в миллиметровую область. Для решения указанных задач требуется разработка специальных *радиометрических измерительных приемников* (РИП) КВЧ-диапазона, способных принимать, распознавать и измерять низкоинтенсивные случайные сигналы на фоне более мощных шумов входных элементов [1]. Обеспечение необходимой помехозащищенности, а следовательно, и высокой точности измерения параметров сигналов требует качественной оптимизации параметров работы входных КВЧ-элементов схемы как основных источников погрешностей измерений. Поскольку из-за отсутствия необходимой элементной базы КВЧ-диапазона часто приходится применять схемы супергетеродинного типа, то смеситель, имеющий нелинейную характеристику преобразования, следует рассматривать также как каскад, влияющий на точность оценки параметров выходного сигнала.

Постановка задачи. Задача нелинейного преобразования детерминированных сигналов достаточно изучена, однако для нелинейных систем, работающих со случайными сигналами, ее решение сдерживается рядом принципиальных проблем [2].

Поэтому задачей данной работы является предложение метода, позволяющего проводить анализ спектра мощности шумовых сигналов на выходе смесителя радиометрического приемника крайне высокой частоты на примере воздействия случайных сигналов на полупроводниковый диод, включённый в конце длинной линии.

Основная часть

Корреляционные функции и энергетические спектры широко используются при анализе и сопоставлении параметров различных радиометрических систем, особенно в условиях воздействия помех на полезные сигналы [3], [4].

Для анализа спектра сигналов на выходе смесителя радиометрического приемника крайне высокой частоты с монохроматическим гетеродином необходимо описать преобразование случайного широкополосного сигнала большой амплитуды на нелинейном неинерционном элементе.

За основу возьмем входной каскад функциональной схемы супергетеродинного корреляционного радиометра, изображенной на рис. 1 [5]. В схеме обозначено: X1 – приемная антенна, A1 – двойной волноводный тройник, R1 – эквивалент приемной антенны, U1 и U2 – КВЧ-смесители, имеющие одинаковые параметры, A2 и A4 – вентили, имеющие одинаковые параметры и G1 – гетеродин монохроматического сигнала.

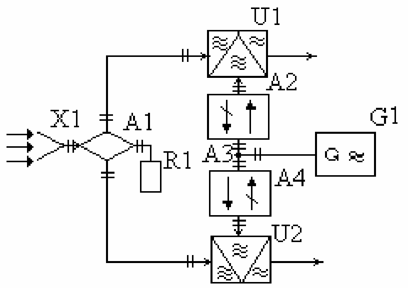


Рисунок 1 – Функциональная схема входного каскада супергетеродинного корреляционного радиометра (обозначение в тексте)

Поскольку параметры смесителей U1 и U2 и вентилей A2 и A4 между собой попарно равны, то рассмотрим работу только смесителя U1. Представим смеситель U1 в качестве длинной линии, подключенной в конце к нелинейному неинерционному элементу *pin*-диоду (рис. 2).

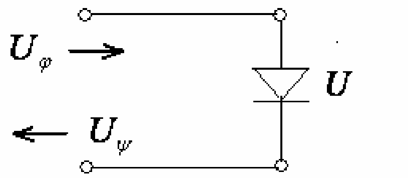


Рисунок 2 – Эквивалентная схема длинной линии с нелинейным неинерционным элементом (обозначение в тексте)

В схеме обозначено: U_φ – падающая волна, имеющая нормальный закон распределения, U_ψ – отраженная волна от нелинейного неинерционного элемента, подключенного в конце линии и U – напряжение на нелинейном элементе.

Связь напряжения падающей волны U_φ с напряжением на нелинейном элементе U, с вольт-амперной характеристикой $I := e^{U} - 1$, определяется неявным уравнением:

$$\left(e^{U} - 1\right)\cdot z + U = 2\cdot U_{.\square} + 2\cdot U_{.0}\cdot\sin(\omega\cdot t), \qquad (1)$$

где: U_0 – напряжение на смесительном диоде, z – волновое сопротивление линии, на конце которой включен смесительный диод.

Падающая волна представляет собой сумму монохроматического сигнала гетеродина и случайного измеряемого сигнала. Решение этого неявного уравнения относительно напряжения на нелинейном элементе U будет содержать гармонические составляющие, кратные частоте гетеродина, и случайные составляющие широкого спектра.

Спектр напряжения на нелинейном элементе U определяется выражением

$$U(\omega) := \int_{\frac{-\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} U(t)\cdot e^{1i\cdot\omega\cdot t}\,dt, \qquad (2)$$

а спектр тока – выражением

$$I(\omega) := \int_{\frac{-\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \left(e^{U(t)} - 1\right)e^{1i\cdot\omega\cdot t}\,dt\,. \qquad (3)$$

Тогда мощность спектральных составляющих сигнала гетеродина на нелинейном элементе можно представить как усредненное по ансамблю значение случайного измеряемого сигнала, определяемого произведением спектра напряжения на сопряженный спектр тока

$$P(\omega) := \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega)\cdot I(\omega)\cdot\frac{e^{\frac{-U_{.\square}^{2}}{2\sigma^{2}}}}{\sqrt{2\cdot\pi\cdot\sigma}}\,dU_{.\square}\,. \qquad (4)$$

В то же время корреляционная функция случайного сигнала на нелинейном элементе будет иметь следующий вид:

$$B(\tau) := \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} U\cdot I_{.\tau}\cdot P\left(U, U_{.\tau}, \tau\right)dU\,dU_{.\tau} \qquad (5)$$

где B(T) – двумерная плотность вероятности для двух сечений случайного процесса сдвинутых друг относительно друга на время – T.

Если допустить, что случайный сигнал подчиняется нормальному закону распределения и является эргодическим, при этом двумерная плотность вероятности имеет вид:

$$P\left(U, U_{.\tau}, \tau\right) := \frac{1}{2\cdot\pi\,\sigma\cdot\sqrt{1 - r(\tau)}}\cdot e^{\frac{-U^{2}+U_{.\tau}^{2}-2\cdot U\cdot U_{.\tau}\cdot r(\tau)}{\sigma^{2\cdot\left(1-r(\tau)^{2}\right)}}}\,, \qquad (6)$$

а спектр мощности соответствует спектру идеального полосового сигнала в области частот вблизи частоты гетеродина, тогда корреляционная функция будет иметь вид:

$$r(\tau) := \frac{2\cdot\Delta\omega}{\pi}\cdot\frac{\sin(\Delta\omega\cdot\tau)}{\Delta\omega\cdot\tau}\cdot\cos(\omega\cdot\tau). \qquad (7)$$

На рис. 3 представлен спектр мощности входного сигнала.

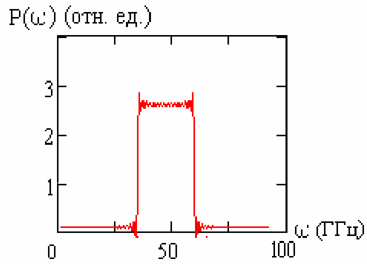


Рисунок 3 – Графическая зависимость спектра мощности входного сигнала

Одновременно в случае, если случайный сигнал подчиняется нормальному закону распределения, корреляционную функцию можно представить также в виде ряда:

$$B(\tau) := \sum_{n=0}^{\infty} \left(C_{.nu} \cdot C_{.ni} \cdot \frac{r(\tau)^n}{n!} \right), \qquad (8)$$

где входящие в корреляционную функцию величины представляют собой:

$$C_{.nu} := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U \cdot H_{.n}(U) \cdot e^{\frac{-U^2}{2 \cdot \sigma^2}}\, dU$$

$$C_{.ni} := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} I \cdot H_{.n}(U) \cdot e^{\frac{-U^2}{2 \cdot \sigma^2}}\, dU$$

Hn(U) – полином Эрмита.

Вышеуказанный ряд достаточно быстро сходится. Однако в результате взаимодействия случайного сигнала с сигналом гетеродина выходной процесс перестает быть стационарным.

В этом случае необходимо провести усреднение коэффициентов c_{nu}, c_{ni} по периоду гетеродина.

$$C_{.n} := \int_{\frac{-\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} C_{.nu} \cdot \frac{C_{.ni}}{2 \cdot \pi \cdot n!}\, dt. \qquad (9)$$

Корреляционная функция после усреднения коэффициентов будет иметь вид:

$$B(\tau) := \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_{..n} \cdot r(\tau)^n \right). \qquad (10)$$

Постоянную составляющую мощности, выделяющуюся на смесительном диоде, находим из выражения, получаемого путем усреднения по периоду сигнала гетеродина и ансамблю случайного сигнала произведения тока на напряжение:

$$P := \int_{-5 \cdot \sigma_{.v}}^{5 \cdot \sigma_{.v}} \int_{\frac{-\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{I \cdot U \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{e^{\frac{-U_{.\varphi}^{\,2}}{2 \cdot \sigma^2}}}{\sqrt{2 \cdot \pi}\, \sigma}\, dt\, dU_{.\varphi}. \qquad (11)$$

При приеме гетеродинным радиометром шумовых низкоинтенсивных сигналов, модулированных меандром, на выходе смесителя полезный сигнал будет переменным. В моменты времени, когда измеряемый шум не поступает на смеситель, а случайная составляющая сигнала определяется шумами смесителя – постоянная составляющая выходного сигнала будет минимальной. Разность мощностей выходного сигнала определяется разностью мощностей шума на входе. Поскольку измеряемый шумовой сигнал и собственный паразитный шум смесителя между собою не коррелированы, то дисперсию входного случайного сигнала можно определить как сумму соответственно дисперсий полезного сигнала и шума смесителя.

$$\sigma^2 := \sigma_{.g}^2 + \sigma_{.s}^2. \qquad (12)$$

Мощность на выходе смесителя определяется выражением:

$$P_{.m} := P_{.s} - P_{.g}. \qquad (13)$$

где P_S – постоянная составляющая мощности сигнала на выходе смесителя, когда на смеситель поступает измеряемый шум вместе с шумом смесителя; Pg – постоянная составляющая мощности сигнала, когда измеряемый шум не поступает на смеситель.

Спектр шума на выходе смесителя, согласно теоремы Винера – Хинчена, находится как преобразование Фурье от корреляционной функции. Используя ранее полученное выражение для выходной корреляционной функции, получим выражение для спектра выходного шума:

$$P(\omega) := \sum_{n=1}^{\infty} \left(C \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega \cdot \tau) \cdot r(\tau)^n \, d\tau \right), \qquad (14)$$

Отношение «сигнал/шум» на выходе смесителя при постоянной времени синхронного детектора, равной τ_d будет иметь вид:

$$\frac{s}{v} := \frac{P_{.m} \cdot \tau_{.d}}{P(\omega)}. \qquad (15)$$

Проведенные расчеты спектра мощности случайных сигналов на выходе смесителя радиометра при различном обратном токе смесительного диода (рис. 4) и при различном напряжении на смесительном диоде (рис. 5, 6) показывают, что подбором указанных величин можно оптимизировать значение мощности выходного сигнала. В случае некритичности шумов смесителя преобладающими факторами, приводящими к увеличению флуктуационного порога чувствительности радиометра, будут являться шумы каскадов, стоящих после смесителя, и шум гетеродина. Оптимизация выходной мощности в этом случае позволит повысить отношение «сигнал/шум» высокочувствительного радиометрического приемника (рис. 7).

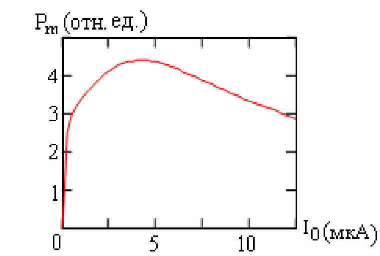


Рисунок 4 – Графическая зависимость мощности сигнала на выходе смесителя от обратного тока смесительного диода при амплитуде гетеродина 75 мВ

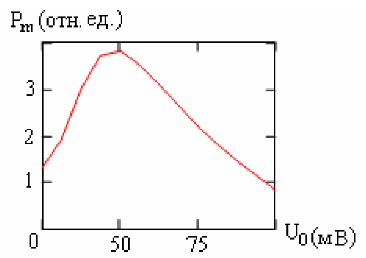


Рисунок 5 – Графическая зависимость мощности на выходе смесителя от амплитуды гетеродина при обратном токе смесительного диода 100 мкА

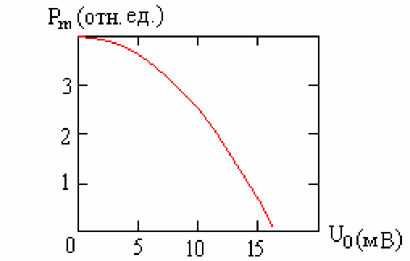


Рисунок 6 – Графическая зависимость мощности входного сигнала от напряжения гетеродина при обратном токе смесительного диода 5 мкА

Анализ расчетов спектра на выходе смесителя (рис. 8) показывает, что существуют области частот гетеродина, где практически паразитный шум смесителя не проявляется, а вблизи нулевой частоты наблюдается пик интенсивности, что дает основание для снижения флуктуационного порога чувствительности радиометра делать двойное гетеродинирование сигнала. В нашем случае частоту второго гетеродина целесообразнее выбрать равной 25 ГГц. Отрицательный спектр мощности вблизи нулевой и двойной частот объясняется тем, что диод при нелинейном преобразовании сигнала является на этих частотах источником ЭДС (в нем направление тока и напряжения противоположны). На рис. 8 обозначены: 1 – спектр мощности шума на выходе смесителя в полосе частот входного сигнала (масштаб данной функции уменьшен в 100 раз), 2 – спектр мощности шума на выходе смесителя вне полосы частот входного сигнала.

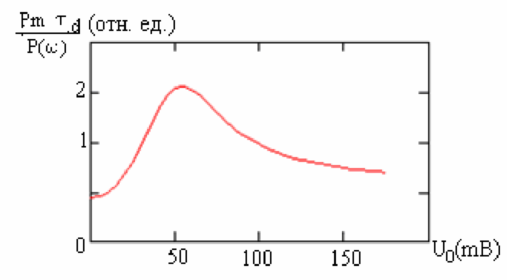


Рисунок 7 – Отношение «сигнал /шум» в зависимости от амплитуды гетеродина на частоте 25 ГГц при обратном токе смесительного диода 25 мкА

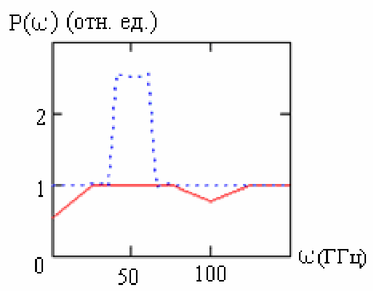


Рисунок 8 – Спектр мощности паразитного шума на выходе смесителя при обратном токе смесительного диода 10 мкА и амплитуде гетеродина 75 мВ (обозначения в тексте)

Анализ оценки спектра мощности случайных сигналов на выходе смесителя радиометра крайне высокой частоты показывает, что в спектре шумов смесителя существуют области с низким уровнем шума, это делает соответствующие области спектра предпочтительными для первого гетерод1нного переноса полезного сигнала при двойном гетеродинировании. На основе предложенной математической модели смесителя шумоподобного измеряемого сигнала и монохроматического гетеродина можно провести теоретическую оптимизацию параметров смесителя с целью снижения порога флуктуационной чувствительности радиометра.

Выводы

Проведенное математическое моделирование и экспериментальное исследование показывают, что предложенный метод расчетов позволяет проводить анализ спектра мощности шумовых низкоинтенсивных сигналов на выходе смесителя радиометра крайне высокой частоты. На основе вычисления спектральной плотности мощности случайного сигнала и полезной мощности, выделяющейся на нелинейном элементе, включённом в конце длинной линии, можно провести оптимизацию высокочувствительного радиометрического приемника.

Исследования показывают, что:

– спектральная плотность мощности случайных сигналов на выходе смесителя может рассчитываться с учетом задаваемой точности;

– расчет может быть проведен без аппроксимации или упрощения неявной зависимости напряжения и тока через нелинейный элемент в зависимости от напряжения падающей волны в длинной линии;

– в спектре шумов смесителя существуют области с низким уровнем шума, это делает соответствующие области спектра предпочтительными для первого гетеродинного переноса полезного сигнала при двойном гетеродинировании;

– можно провести теоретическую оптимизацию параметров смесителя с целью понижения порога флуктационной чувствительности радиометра.

Литература

1. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / [Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.Ф. и др.]. – Житомир : Волынь, 2003. – 408 с.
2. Сергиенко С.П. Спектр мощности, выделяющейся на нелинейном элементе, включенном в конец длинной линии при падающей волне гауссового случайного процесса / С.П. Сергиенко, В.А. Богатырев, А.А. Ткаченко Вестник Донецкого университета. Серия А. Природничі науки. – 2008. – № 2. – С. 231-233.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Левин Б.Р. – 3 изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.
4. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники : в 2 т. [учебник для вузов / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. – 3-е изд., перераб.и доп. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – Т. 1. – 536 с.
5. Патент №49190 (Україна), G01R17/00, A61B5/05 Одновходовий супергетеродинний кореляційний радіометр / Куценко В.П. – Опубл. 26.04.2010; Бюл. № 8.

В.П. Куценко, С.П. Сергиенко

Аналіз спектра потужності випадкових сигналів на виході змішувача радіометра вкрай високої частоти

Запропоновано метод, що дозволяє проводити аналіз спектра потужності шумових низькоінтенсивних сигналів на виході змішувача радіометра вкрай високої частоти, на основі впливу випадкового сигналу на напівпровідниковий діод, включений наприкінці довгої лінії.

V.P. Kutsenko, S.P. Sergienko

Analysis of Spectrum of Casual Signals Power on the Output of Mixer of Extremely High Frequencies Radiometer

The method, allowing to carry out the analysis of a spectrum of capacity of noise low intensive signals on an exit of the amalgamator of radio metre of the highest frequency, on the basis of influence of a casual signal on the semi-conductor diode included in the end of a long line is offered.

Статья поступила в редакцию 22.06.2010.